

МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ СССР

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО
ТРАНСПОРТА им. М.И.КАЛИНИНА

На правах рукописи

БЕЛОУС Петр Александрович

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СТАЛЬНЫХ
КАНАТОВ ПРИ ПОЛЗУЧЕСТИ

Специальность 01.02.03 - строительная механика

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Днепропетровск
1980

НТБ
ДНУЖТ

Работа выполнена на кафедре "Сопротивление материалов"
Одесского ордена Трудового Красного Знамени политехнического
института

Научный руководитель – доктор технических наук,
профессор КОЗЛОВ В.Т.

Научный консультант – доктор технических наук,
профессор РАБОТЯГОВ Д.Д.

Официальные оппоненты – доктор физико-математических наук,
профессор ГОРОШКО О.А.
кандидат технических наук,
доцент ВЕТРОВ А.П.

НТБ
ДНУЖТ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Широкое распространение в строительстве получили предварительно напряженные железобетонные и металлические конструкции, в которых одним из конструктивных элементов являются стальные канаты. Здесь, за время длительной эксплуатации (50+100 лет), в канатах, находящихся под постоянным натяжением, накапливаются деформации ползучести, а в канатах, получивших оставшуюся неизменной деформацию, релаксируют напряжения.

Реологическая стойкость канатов обычно оценивается по зависимости, получаемым статистическим анализом результатов экспериментов. В настоящее время имеются эмпирические формулы для деформаций ползучести и потерь напряжений от релаксации в канатах некоторых конструкций, однако они получены не для всех типоразмеров канатов, не учитывают параметры связки и, кроме того, не имеют широкого экспериментального подтверждения, в связи с чем их нельзя считать безоговорочно пригодными для практических расчетов.

Одно лишь опытное изучение поведения канатов во времени вне обобщающих теоретических представлений малоэффективно, т.к. реологические испытания канатов весьма трудоемки и требуют больших затрат времени для получения результатов по всем типоразмерам всей номенклатуры канатов с различными параметрами связки. Рассматривая канат как агрегатное целое, оно не выявляет его истинного напряженно-деформированного состояния, что при определении агрегатных реологических характеристик по эмпирическим формулам может привести к существенным ошибкам. Для канатов с разрывным усилием более 2000 кН оно вообще невозможно из-за отсутствия надлежащего оборудования. Современная же тенденция развития канатных элементов в строительных конструкциях подразумевает их укрупнение: использование канатов с разрывным усилием 3000 кН и более. Поэтому существенным вкладом в общую систему знаний о реологии канатов явилось бы вскрытие их истинного напряженно-деформированного состояния при ползучести и получение на этой основе зависимостей, позволяющих определять агрегатные реологические характеристики любых канатов по результатам сравнительно простых испытаний составляющих канат проволок на ползучесть.

Другая сторона проявления реологических свойств стальной проволоки-релаксация возникающих в проволоках и канатах при их изготовлении технологических напряжений. Здесь имеются лишь некоторые экспериментальные исследования, а отдельные теоретические разработки не всегда строгие и проведены на базе эмпирических зависимостей не получили всесторонней опытной проверки. Источником формул для техно-

НАУКОВО-ТЕХНІЧНА БІБЛІОТЕКА
Дніпропетровського державного
університету залізничного транспорту
Імені академіка В. Лазаряна

6844a

гических напряжений при релаксации стали бы важным подспорьем для оценки эффективности (с позиции снижения этих напряжений) температурной обработки проволок и канатов.

Цель работы. 1) Вывести зависимости для деформации ползучести и потерь напряжений от релаксации в применяемых в строительных конструкциях стальных канатах и разработать методику расчета их агрегатных реологических характеристик; 2) получить достоверные формулы для технологических напряжений в стальных проволоках и канатах при релаксации.

Научная новизна. 1) Установлены формы технических теорий ползучести для материала стальной проволоки; 2) решена задача теории ползучести применяемых в строительных конструкциях стальных канатов: выявлено истинное напряженно-деформированное состояние канатов и выведены формулы для агрегатных реологических характеристик (деформаций ползучести в случаях установившейся и не установившейся ползучести и потерь напряжений от релаксации) канатов любых конструкций в любой момент времени; 3) теоретически исследована на базе технических теорий ползучести релаксация остаточных напряжений от волочения в стальной проволоке и свивочных напряжений в спиральном канате.

Практическая ценность и реализация. Результаты работы могут быть использованы для расчетов реологических характеристик таких элементов строительных конструкций, как отдельные проволоки, пучки проволок, невитые и витые канаты, а также позволяют производить оценку эффективности (с позиции снижения технологических напряжений) температурной обработки проволок и канатов. Разработанная "Методика расчета агрегатных реологических характеристик стальных канатов" использовалась при выполнении научно-исследовательских работ НИИ бетона и железобетона Госстроя СССР и ВНИИметизом, а результаты исследования релаксации технологических напряжений нашли применение в хозяйственных работах.

Апробация. Результаты работы докладывались: на научно-технических конференциях Одесского политехнического института (1974, 1977, 1978); на Всесоюзных симпозиумах по прочности и долговечности стальных канатов (Одесса, 1974; Ильичевск, 1976, 1977); на Всесоюзной научно-технической конференции "Высокопрочная проволочная арматура и ее применение в железобетонных конструкциях" (Волгоград, 1977).

Публикации. По материалам работы опубликовано 4 статьи.

Объем. Работа состоит из введения, 5 глав, выводов, списка литературы из 81 наименования, приложений, включающих программы расчетов и документы о внедрении, и содержит 103 страницы основного машинописного текста, 15 рисунков и 11 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дан анализ вопроса о реологии стальных проволок и канатов и обосновывается актуальность рассмотренных задач. Изложены новые научные результаты и положения, вынесенные на защиту.

Глава I. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Проведен обзор феноменологических теорий ползучести конструкционных сплавов. Дан критический анализ экспериментальных исследований ползучести проволок и канатов, теоретических исследований напряженно-деформированного состояния канатов при ползучести, экспериментально-теоретических исследований релаксации технологических напряжений в проволоках и канатах.

Обзор и анализ исследований реологических процессов, протекающих в стальных проволоках и канатах, привел к следующим выводам.

1. Для явления ползучести проволок характерны те же особенности, что и для конструкционных сплавов, что позволяет привлечь для его описания технические теории ползучести.

2. Эмпирические формулы для агрегатных реологических характеристик получены лишь для арматурных канатов конструкции I×7 (А.И.Семеновым), а также для канатов конструкций I×19, 7×19 (В.П.Сивачевым), I×37, 7×37 (Б.М.Сушенцевым). Для последних характерен ряд недостатков: 1) они получены не для всех типоразмеров канатов и не учитывают параметры свивки; 2) для канатов конструкций I×19, 7×19 агрегатные реологические характеристики линейно зависят от напряжений (это противоречит результатам экспериментов всех других авторов), а для канатов конструкций I×37, 7×37 формулы определяют лишь конечные значения этих характеристик (за 50 лет); 3) отсутствует всесторонняя экспериментальная проверка этих формул. Общим же недостатком отмеченных эмпирических формул является то, что они не рассматривают канат как сложную стержневую систему и, следовательно, не отражают его истинного напряженно-деформированного состояния.

3. Вопрос об истинном напряженно-деформированном состоянии канатов при ползучести остается открытым, т.к. теоретические исследования его выполнены (В.П.Сивачевым, В.Ф.Волоконским, И.М.Чадном) на базе нереальных для материала стальной проволоки теорий ползучести, без четкой постановки задачи, с ошибками при выводе конечных формул.

4. По вопросу релаксации технологических напряжений в проволоках и канатах имеются лишь экспериментальные исследования В.А.Красильникова и В.А.Чертоусова и теоретические разработки В.И.Туманского. Последние, однако, проведенные на базе феноменологической зависимости не являющейся уравнением механического состояния и не получившей ши-

рокой экспериментальной проверки, не всегда правильно отражает реальный характер релаксации.

В конце главы сформулированы поставленные в работе задачи.

Глава 2. ВЫВОД ФОРМУЛ ДЛЯ РАСЧЕТА АГРЕГАТНЫХ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛЬНЫХ КАНАТОВ

Решается задача теории ползучести канатов из круглых проволок для условий эксплуатации в строительных конструкциях при следующих допущениях: 1) напряжения в проволоках от изгиба и кручения пренебрежимы по сравнению с напряжениями растяжения; 2) деформации ползучести проволок подчиняются гипотезе плоских сечений; 3) поперечное сужение каната пренебрежимо мало; 4) материал проволок перед нагружением находится в естественном ненапряженном состоянии; 5) свивка проволок не оказывает существенного влияния на их реологические свойства.

Устанавливаются формы технических теорий ползучести для материала стальных проволок, кривые ползучести которых в координатах $\lg \epsilon_c, \lg \frac{t}{t_1}$, где ϵ_c - деформация ползучести; t - время; $t_1 = 1$ час, и изохорную кривую ползучести при $t = t_1$ в координатах $\lg \epsilon_c, \lg \frac{\sigma}{\sigma_{0.2}}$, где σ - напряжение; $\sigma_{0.2}$ - предел текучести проволоки, можно аппроксимировать прямыми (рис. 1 и 2). Тогда имеет место вариант теории старения

$$\epsilon_c = \bar{A} \sigma^m t^n, \quad (I)$$

где $\bar{A} = \frac{A}{\sigma_{0.2}^m t_1^n}$.

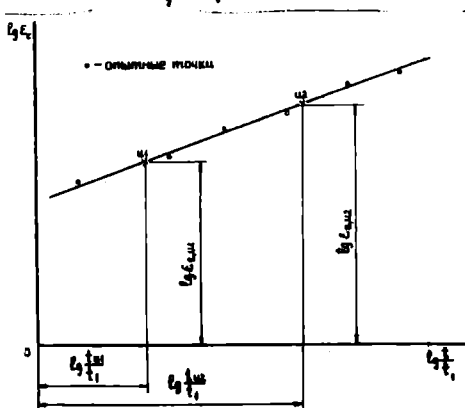


рис.1. Аппроксимация опытной кривой ползучести проволоки

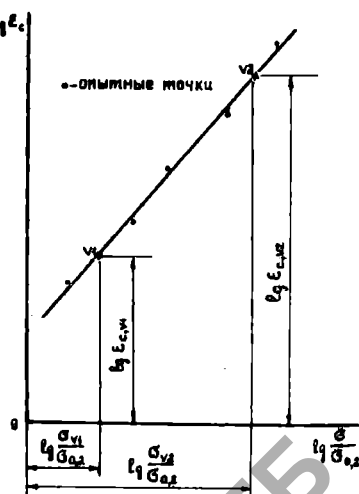


рис.2. Аппроксимация опытной изохорной кривой ползучести проволоки при $t = 1$ час

коэффициенты, характеризующие ползучесть проволоки, определяются по формулам, представленным на рис.1 и 2,

$$n = \frac{\lg \frac{\varepsilon_{c,u2}}{\varepsilon_{c,u1}}}{\lg \frac{t_{u2}}{t_{u1}}}, \quad m = \frac{\lg \frac{\varepsilon_{c,v2}}{\varepsilon_{c,v1}}}{\lg \frac{G_{v2}}{G_{v1}}}, \quad \lg A = \lg \varepsilon_{c,u(v2)} - m \lg \frac{G_{v1}(v2)}{G_{0,2}}. \quad (2)$$

Используя для ε_c при $G = \text{const}$ уравнение (1), получили формы других технических теорий ползучести:

$$\begin{array}{ll} \text{теория течения} & \text{теория упрочнения} \\ \dot{\varepsilon}_c = n \bar{A} G^m t^{n-1}; & \dot{\varepsilon}_c = n \bar{A} G^{\frac{m}{n}} \varepsilon_c^{1-\frac{1}{n}}. \end{array} \quad (3)$$

Полная система уравнений теории ползучести канатов, помимо какого-то из уравнений механического состояния (1), (3), содержит уравнения равновесия и совместности деформаций, которые, согласно работам акад. А.Н.Динника, имеют вид:

уравнение равновесия спирального каната

$$\sum_{i=0}^s F_i K_i \cos \alpha_i G_i = T, \quad (4)$$

где s - число слоев наклонных проволок; F - площадь поперечного сечения проволоки; K - число проволок; α - угол свивки проволоки; T - усилие, растягивающее канат;

уравнение равновесия каната двойной свивки

$$\sum_{j=0}^l r_j \cos \beta_j \sum_{i=0}^s F_{ij} K_{ij} \cos \alpha_{ij} G_{ij} = T, \quad (5)$$

где l - число слоев наклонных прядей; Γ - число прядей; β - угол свивки пряди;

уравнения совместности деформаций:

$$\begin{array}{ll} \text{спиральный канат} & \text{канат двойной свивки} \\ \varepsilon_i = \varepsilon_0 \cos^2 \alpha_i; & \varepsilon_{ij} = \varepsilon_{00} \cos^2 \beta_j \cos^2 \alpha_{ij}, \end{array} \quad (6)$$

где ε - относительное удлинение проволоки. В уравнениях (4)-(6), где индекс i относится к i -тому слою проволок спирального каната (пряди каната двойной свивки), а индекс j - к j -тому слою прядей, центральная проволока спирального каната (пряди) считается его нулевым слоем проволок, а центральная прядь каната двойной свивки - его нулевым слоем прядей.

В канате, как в статически неопределимой системе, рост деформаций ползучести связан с изменением напряжений в проволоках от начальных G^1 , формулы для которых принадлежат акад. А.Н.Диннику, до полученных в решении задачи установившейся ползучести G^n (когда предполагается, что $G = \text{const}$). Выражения для последних, выведенные на базе зависимостей (1), (6), и уравнения (4), (5) позволили получить

формулы для деформаций ползучести канатов из одинаковых проволок в случае установившейся ползучести:

для спирального каната для каната двойной свивки

$$\varepsilon_c = \bar{A} \left[\frac{T}{\sum_{i=0}^s F_i K_i (\cos \alpha_i)^{\frac{m+2}{m}}} \right]^{m \cdot n}; \quad \varepsilon_c = \bar{A} \left[\frac{T}{\sum_{j=0}^l r_j (\cos \beta_j)^{\frac{m+2}{m}} \sum_{i=0}^s F_{ij} K_{ij} (\cos \alpha_{ij})^{\frac{m+2}{m}}} \right]^{m \cdot n} \quad (7)$$

Задача неуставившейся ползучести ($G \neq \text{const} \dots$) канатов из одинаковых проволок решалась на базе теории старения по методике, рекомендованной Н.Н.Малининым. Выведены формулы для деформаций ползучести:

$$\varepsilon_c = \left[G_0' + (G_0'' - G_0') \frac{t_{ck}^*}{1 + t_{ck}^*} \right]^m \bar{A} t^n; \quad \varepsilon_c = \left[G_{00}' + (G_{00}'' - G_{00}') \frac{t_k^*}{1 + t_k^*} \right]^m \bar{A} t^n, \quad (8)$$

где

$$t_{ck}^* = -A_{ck} E \bar{A} t^n; \quad t_k^* = -A_k E \bar{A} t^n;$$

$$A_{ck} = \frac{\sum_{p=0}^s F_p K_p \cos \alpha_p \left[\frac{(G_p')^m}{\cos^2 \alpha_p} - \frac{(G_p'')^m}{\cos^2 \alpha_p} \right] (G_p'' - G_p')}{\sum_{i=0}^s \frac{F_i K_i}{\cos \alpha_i} (G_i'' - G_i')^2};$$

$$A_k = \frac{\sum_{q=0}^l r_q \cos \beta_q \sum_{p=0}^s F_{pq} K_{pq} \cos \alpha_{pq} \left[\frac{(G_{pq}')^m}{\cos^2 \beta_q \cos^2 \alpha_{pq}} - \frac{(G_{pq}'')^m}{\cos^2 \beta_q \cos^2 \alpha_{pq}} \right] (G_{pq}'' - G_{pq}')}{\sum_{j=0}^l \frac{r_j}{\cos \beta_j} \sum_{i=0}^s \frac{F_{ij} K_{ij}}{\cos \alpha_{ij}} (G_{ij}'' - G_{ij}')^2}$$

Исследуя релаксацию напряжений в канатах, с помощью уравнений (6) установили, что релаксация напряжений в каждом слое проволок спирального каната (пряди) независима от других проволок. Уравнения релаксации напряжений в проволоках имеют вид:

теория старения

теория течения

теория упрочнения

$$t^* = \frac{1 - G^*}{(G^*)^m}; \quad G^* = \frac{1}{m-1 \sqrt{1 + (m-1)t^*}}; \quad n(t^*)^{\frac{1}{n}} = \int_{G^*}^1 \frac{(1-\xi)^{\frac{1}{n}-1}}{\xi^{\frac{1}{n}}} d\xi, \quad (9)$$

где безразмерное время $t^* = E \bar{A} t^n (G^*)^{m-1}$, а безразмерное напряжение $G^* = \frac{\sigma}{G}$. Учитывая, что G^* близко к единице, из уравнения теории старения получили также приближенное соотношение

$$G^* = 1 - \left(\sqrt[3]{R - \frac{a}{2}} - \sqrt[3]{R + \frac{a}{2}} - \frac{2}{3m} \right), \quad (10)$$

где

$$R = \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{b}{3}\right)^3}; \quad a = -\frac{2}{m^2} \left(\frac{10}{27m} + t^* \right); \quad b = \frac{2}{3m^2}.$$

Используя формулы для начальных напряжений в проволоках каната, заменой в зависимостях (9), (10) σ^* на σ_i^* и t^* на t_i^* для спирального каната и σ^* на σ_{ij}^* и t^* на t_{ij}^* для каната двойной свивки записали уравнения релаксации напряжений в проволоках каната, а на базе уравнений (4), (5) получили формулы, связывающие усилия T в начальный и произвольный моменты времени:

спиральный канат

канат двойной свивки

$$\frac{T(t)}{T(t_0)} = \frac{\sum_{i=0}^n F_i K_i \cos^3 \alpha_i \sigma_i^*}{\sum_{i=0}^n F_i K_i \cos^3 \alpha_i}; \quad \frac{T(t)}{T(t_0)} = \frac{\sum_{j=0}^n r_j \cos^3 \beta_j \sum_{i=0}^n F_{ij} K_{ij} \cos^3 \alpha_{ij} \sigma_{ij}^*}{\sum_{j=0}^n r_j \cos^3 \beta_j \sum_{i=0}^n F_{ij} K_{ij} \cos^3 \alpha_{ij}}. \quad (II)$$

Безразмерные времена t_i^* и t_{ij}^* определяются следующим образом:

$$t_i^* = E_i A_i t_0^{n_i} \left[\frac{T(t_0) \cos^3 \alpha_i}{\sum_{i=0}^n F_i K_i \cos^3 \alpha_i} \right]^{m_i-1}; \quad t_{ij}^* = E_{ij} A_{ij} t_0^{n_{ij}} \left[\frac{T(t_0) \cos^3 \alpha_{ij} \cos^3 \beta_j}{\sum_{j=0}^n r_j \cos^3 \beta_j \sum_{i=0}^n F_{ij} K_{ij} \cos^3 \alpha_{ij}} \right]^{m_{ij}-1}. \quad (I2)$$

Глава 3. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЛАКСАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В СТАЛЬНЫХ ПРОВОЛОКЕ И КАНАТАХ

Получены формулы для технологических напряжений в проволоке и спиральном канате при релаксации при следующих допущениях: 1) из остаточных напряжений в проволоке от волочения учитываются лишь осевые напряжения $\tilde{\sigma}_z^0$; 2) считаем, что $\tilde{\sigma}_z^0$ изменяются по законам:

$$\tilde{\sigma}_1^0 = \tilde{\sigma}_{z,n}^0 \cdot \frac{r - r_0}{r - r_0}, \quad r_0 \leq r \leq r; \quad \tilde{\sigma}_2^0 = \tilde{\sigma}_{z,n}^0 \cdot \frac{r_0 - r}{r_0}, \quad 0 \leq r \leq r_0. \quad (I3)$$

где $\tilde{\sigma}_{z,n}^0$ и $\tilde{\sigma}_{z,n}^0$ - абсолютные величины $\tilde{\sigma}_z^0$ соответственно на поверхности и в центре проволоки; r и r_0 - радиусы слоя соответственно, где определяются $\tilde{\sigma}_z^0$ и где $\tilde{\sigma}_z^0$ положено равным нулю, причем

$$r_0 = \frac{4r}{1 + \sqrt{1 + 8 \left(1 + \frac{\tilde{\sigma}_{z,n}^0}{\tilde{\sigma}_{z,n}^0} \right)}}; \quad (I4)$$

r - радиус оечения проволоки; 3) закон распределения напряжений по сечению проволоки при релаксации не меняется; 4) при свивке проволоки испытывает лишь изгибную деформацию; 5) материал проволок идеально пластичен.

В задаче о релаксации напряжений $\tilde{\sigma}_z^0$ эти напряжения в произвольный момент времени $\tilde{\sigma}_z^0$ будут изменяться по законам:

$$\overset{\text{растягивающие}}{\tilde{\sigma}_1 = \tilde{\sigma}_{\Sigma,n} \cdot \frac{r-r_0}{r-r_0}}, r_0 \leq r \leq r; \quad \overset{\text{сжимающие}}{\tilde{\sigma}_2 = \tilde{\sigma}_{\Sigma,u} \cdot \frac{r_0-r}{r_0}}, 0 \leq r \leq r_0. \quad (15)$$

Т.к. теории ползучести (1), (3) описывают релаксацию напряжений лишь одного знака, мысленно, при любом времени, расчленим проволоку на области с растягивающими и сжимающими напряжениями $\tilde{\sigma}_2$. Это вызовет укорочение и удлинение областей соответственно с $\tilde{\sigma}_1$ и $\tilde{\sigma}_2$. Поэтому, к торцам первой области приложим растягивающую силу P_1 , а к торцам второй-сжимающую силу P_2 , такие, что

$$P_1 = \int_{F_2} \tilde{\sigma}_2 dF_2; \quad P_2 = \int_{F_1} \tilde{\sigma}_1 dF_1, \quad (16)$$

где F_1 и F_2 - части площади поперечного сечения проволоки, где действуют напряжения соответственно $\tilde{\sigma}_1$ и $\tilde{\sigma}_2$. Учитывая, что полные удлинение области с $\tilde{\sigma}_1$ и укорочение области с $\tilde{\sigma}_2$ состоят из упругого удлинения (укорочения) и удлинения (укорочения) в процессе ползучести, на базе условия неразрывности деформаций на границе областей с $\tilde{\sigma}_1$ и $\tilde{\sigma}_2$ и уравнений (1), (3) получили зависимости, описывающие релаксацию напряжений $\tilde{\sigma}_2$:

по теории старения по теории течения по теории упрочнения

$$\frac{1-\tilde{\sigma}^*}{(\tilde{\sigma}^*)^m} = \tilde{t}^*; \quad \frac{1}{m-1} [(\tilde{\sigma}^*)^{1-m} - 1] = \tilde{t}^*; \quad n(\tilde{t}^*)^{\frac{1}{n}} = \int_{\tilde{\sigma}^*}^1 \frac{(1-\xi)^{\frac{1}{n}-1}}{\xi^{\frac{1}{n}}} d\xi \quad (17)$$

на базе зависимости (10)

$$\tilde{\sigma}^* = 1 - \left(\sqrt[3]{\tilde{R} - \frac{\tilde{\sigma}}{2}} - \sqrt[3]{\tilde{R} + \frac{\tilde{\sigma}}{2}} - \frac{2}{3m} \right), \quad (18)$$

где

$$\tilde{R} = \sqrt{\left(\frac{\tilde{\alpha}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\tilde{\beta}}{3}\right)^3}; \quad \tilde{\alpha} = -\frac{2}{m^2} \left(\frac{10}{27m} + \tilde{t}^* \right); \quad \tilde{\beta} = \frac{2}{3m^2}.$$

В выражениях (17), (18) безразмерное напряжение

$$\tilde{\sigma}^* = \frac{\tilde{\sigma}_1}{\tilde{\sigma}_1^0} = \frac{\tilde{\sigma}_2}{\tilde{\sigma}_2^0} = \frac{\tilde{\sigma}_{\Sigma,n}}{\tilde{\sigma}_{\Sigma,n}^0} = \frac{\tilde{\sigma}_{\Sigma,u}}{\tilde{\sigma}_{\Sigma,u}^0}, \quad (19)$$

а безразмерное время

$$\tilde{t}^* = \frac{1}{3^{m-1}} \cdot \frac{1 + \left(\frac{r_0^2}{r^2 - r_0^2} \right)^m}{1 + \frac{r_0^2}{r^2 - r_0^2}} E A t^n (\tilde{\sigma}_{\Sigma,u}^0)^{m-1} \quad (20)$$

Исследование релаксации свивочных напряжений в спиральном канате, которые по В.Т.Козлову, А.Т.Киршанкову определяются в сечении проволоки i -го слоя следующими формулами:

в упругой области

в пластической области

$$\sigma_{x,i}^{*y} = E \varepsilon_i y; \quad \sigma_{x,i}^{*nl} = \sigma_{0,2}, \quad (21)$$

где ε - кривизна осевой линии проволоки; y - ордината точки упругой области, основывалось на том, что релаксация напряжений в каком-то волокне проволоки зависит от напряжений лишь в этом волокне. На базе уравнений (9) получены формулы для свивочных напряжений при релаксации:

по теории течения

$$\sigma_{x,i}^y = \frac{E \varepsilon_i y}{m-1 \sqrt{1+(m-1) \left(\frac{E \varepsilon_i y}{\sigma_{0,2}} \right)^{m-1} t_{cs}^*}}; \quad \sigma_{x,i}^{nl} = \frac{\sigma_{0,2}}{m-1 \sqrt{1+(m-1) t_{cs}^*}}; \quad (22)$$

по теории старения

$$\left(\frac{E \varepsilon_i y}{\sigma_{0,2}} \right)^{m-1} t_{cs}^* = \frac{1 - \sigma_{x,i}^{*y}}{(\sigma_{x,i}^{*y})^{\frac{1}{m}}}; \quad t_{cs}^* = \frac{1 - \sigma_{x,i}^{*nl}}{(\sigma_{x,i}^{*nl})^{\frac{1}{m}}}; \quad (23)$$

по теории упрочнения

$$n \left(\frac{E \varepsilon_i y}{\sigma_{0,2}} \right)^{\frac{m-1}{n}} (t_{cs}^*)^{\frac{1}{n}} = \int_{\frac{\sigma_{x,i}^{*y}}{\sigma_{0,2}}}^1 \frac{(1-\xi)^{\frac{1}{n}-1}}{\xi^{\frac{1}{n}}} d\xi; \quad n (t_{cs}^*)^{\frac{1}{n}} = \int_{\frac{\sigma_{x,i}^{*nl}}{\sigma_{0,2}}}^1 \frac{(1-\xi)^{\frac{1}{n}-1}}{\xi^{\frac{1}{n}}} d\xi \quad (24)$$

где безразмерное время $t_{cs}^* = \frac{E \bar{\sigma}^n}{E \bar{\sigma}^n} t_{cs}^{*y}$, а безразмерные напряжения $\sigma_{x,i}^{*y} = \frac{\sigma_{x,i}^y}{E \varepsilon_i y}$, $\sigma_{x,i}^{*nl} = \frac{\sigma_{x,i}^{nl}}{\sigma_{0,2}}$. Получена также формула для крутящего технологического момента упругой отдачи спирального каната при релаксации по теории течения.

Глава 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ФОРМУЛ ДЛЯ РАСЧЕТА АГРЕГАТНЫХ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛЬНЫХ КАНАТОВ

Изложены сведения об изготовлении опытных партий проволок диаметром 3,0 и 3,3 мм и овитых из них спиральных семипроволочных К-7 и двойной овитки двухпрядных К-2*7 арматурных канатов (канаты имели два варианта угла овитки проволок в канат (прядь) К-7). Т.к. канаты прошли низкотемпературный отпуск (НТО) в агрегатном состоянии, его же прошла и исходная проволока. Описана методика и результаты механических испытаний проволок и канатов.

Реологические испытания проводились при температуре 20±3 С по разработанным в НИИЖБ Госотстоя СССР рекомендациям по методике испытаний арматурных сталей на ползучесть и релаксацию напряжений. Испы-

тания на ползучесть выполнялись на рычажной установке конструкции НИИХБ. Замеры деформаций ползучести производили на базе 750 мм специальным экстензометром с индикаторами с ценой деления 0,001 мм. Такими же индикаторами измеряли поперечные деформации жестких рам, конструкции НИИХБ, на которых проводились испытания на релаксацию напряжений (по этим деформациям находят усилие в образце). Реологические характеристики определяли по результатам испытаний трех образцов-близнецов: один из них выдерживался под нагрузкой 24 часа, а два других-500 либо 1000 часов.

Кривые ползучести исходных проволок для пяти уровней напряжений для каждой проволоки позволили по формулам (2) найти коэффициенты A , m , n . Для проволоки диаметром 3,0 мм $A = 1,65 \cdot 10^{-3}$; $m = 6,55$; $n = 0,136$, а диаметром 3,3 мм $A = 2,36 \cdot 10^{-3}$; $m = 6,46$; $n = 0,223$.

Проведено сравнение опытных и рассчитанных на базе зависимостей (9), (10) потерь напряжений от релаксации для трех уровней начальных напряжений для каждой проволоки. Максимальные расчетные значения получаются по теории течения, меньше-по теории упрочнения, еще меньше-по зависимости (10) и минимальные-по теории старения. Опытные значения находятся между теоретическими по теориям старения и течения и больше теоретических по теории упрочнения. В целом, теории ползучести (1), (3) удовлетворительно описывают явление ползучести стальных проволок. Лучше других согласуется с экспериментом теория упрочнения, несколько хуже-теория старения и хуже всего-теория течения.

Выполнено сравнение опытных и рассчитанных на базе формул (II) потерь условных напряжений $\sigma_y = \frac{T}{F_k}$, где F_k -суммарная площадь поперечных сечений составляющих канат проволок, от релаксации

$$\sigma_n = 1 - \frac{T(t)}{T(t_0)} \quad (25)$$

для двух уровней начальных напряжений для каждого каната. В целом, формулы (II) позволяют получать результаты, близкие к действительным. Качественная картина соотношения опытных и расчетных потерь такая же, как и у проволок.

Расчеты потерь напряжений от релаксации в проволоке и канатах по теориям старения и упрочнения требуют разрешения уравнений (9) относительно σ^* . В первом случае использовали метод касательных, во втором-метод последовательных приближений. В приложениях приводятся программы расчетов этих потерь, составленные на языке ФОРТРАН-4.

Для двух уровней напряжений для каната К-7 и одного для каната К-2м7 опытные деформации ползучести сравнивали с рассчитанными по формулам (7), (8). В целом, опытные значения, весьма близкие к значениям для случая неустановившейся ползучести, которые, в свою оче-

редь, незначительно превышали значения ~~для~~ ползучести, удовлетворительно согласуются с расчетными.

Глава 5. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОВЕДЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Изложен ряд общих рекомендаций по практическому применению полученных результатов.

1. Формулы (7),(8) для деформаций ползучести пригодны лишь для канатов из одинаковых проволок (канаты типа ТК), а формулы (II) для потерь напряжений от релаксации—также и для канатов из разных проволок в случае, когда проволоки имеют одинаковый диаметр в отдельных слоях (канаты типа "Сил"). Для получения коэффициентов A, m, n для канатов типа ТК проводятся испытания на ползучесть извлеченных из каната центральных прямолинейных проволок, а для канатов типа "Сил", кроме того,—исходных (до свивки) боковых проволок всех слоев спирального каната (пряди каната двойной свивки). Если канат в агрегатном состоянии прошел НТО, то эти исходные проволоки перед испытаниями необходимо отпустить по режиму отпуска каната.

2. Формулы (7),(8),(II) позволяют производить сравнительный расчет реологической стойкости канатов различных конструкций, а также выявлять влияние на эту стойкость каната данной конструкции какого-то геометрического фактора (диаметра проволок, их числа, угла свивки) либо физического фактора (коэффициентов, характеризующих ползучесть проволок).

3. Полученные в гл.2 расчетные формулы удовлетворительно согласуются с экспериментами для длительностей до 1000 часов. Проектировщиков строительных конструкций часто интересуют агрегатные реологические характеристики канатов за 50 или 100 лет. Рекомендацию формул (7),(8),(II) для таких длительностей в известной мере можно оправдать тем, что по имеющимся экстраполяциям потери напряжений от релаксации в канатах за 50 лет составляют 150÷200% 1000 часовых потерь, а по расчетным формулам (II)—175÷185%.

4. При расчете деформаций ползучести в канатах можно исходить из предположения установившейся ползучести и использовать формулы (7), т.к. вычисления по более сложным формулам (8) для случая неустановившейся ползучести хотя и позволяют получать результаты ближе к действительным, но не приводят к заметному изменению величин деформаций. При расчете потерь напряжений от релаксации в канатах по формулам (II) при наличии оставленных в настоящей работе программ расчета этих потерь по теориям старения и упрочнения предпочтительнее, для получения результатов более близких к действительным, теория упрочнения, а в случае отсутствия таких программ—зависимость

(10) перед теорией течения.

5. По зависимости (I) можно определять деформации ползучести, а по формулам (9), (10) - потери напряжений от релаксации в стальных проволоках. Их можно использовать также для расчета реологических характеристик пучков параллельных проволок и невитых канатов.

6. Полученные в гл.3 формулы для технологических напряжений в проволоках и канатах при релаксации можно использовать для определения степени снижения этих напряжений при температурной обработке таких изделий. При расчете остаточных напряжений в проволоке от волочения предпочтительнее формула (18), а при расчете свивочных напряжений в спиральном канате - формула (22), что позволяет получать близкие к действительным результаты без привлечения численных методов.

Приводится разработанная по результатам, полученным в гл.2 и 4, "Методика расчета агрегатных реологических характеристик стальных канатов". Она состоит из общих положений по ее использованию, формул (7) для деформаций ползучести и (II), (25) для потерь напряжений от релаксации, причем в формуле (II) безразмерное напряжение σ^* определяется зависимостью (10), программ расчета по этим формулам, составленных на языке ФОРТРАН-4, рекомендаций по испытаниям проволок на ползучесть и формул (2), определяющих по результатам этих испытаний коэффициенты, характеризующие ползучесть составляющих проволок.

По формулам (II), (25) проведена сравнительная оценка релаксационной стойкости спиральных К-7 и двойной свивки К-2*7, К-3*7 канатов из разработанного в НИИБ Госстроя СССР "Основного сортамента арматурных канатов". Анализ потерь напряжений от релаксации, определенных для регламентированных сортаментом минимальных и максимальных углов свивки проволок ($7^\circ 35'$ и $12^\circ 01'$) и прядей ($5^\circ 36'$ и $7^\circ 27'$), показал: 1) релаксационную стойкость канатов К-7, К-2*7, К-3*7 можно приближенно принимать не зависящей от параметров свивки; 2) приближенную оценку этой стойкости канатов двойной свивки из этого сортамента можно производить по результатам испытаний составляющих прядей.

Определена степень снижения вследствие релаксации остаточных напряжений от волочения в струнобетонной проволоке диаметром 5,0 мм при существующем на Волгоградском сталепроволочно-канатном заводе режиме ее НТО (температура 400°C , время 43 сек). Описаны методика и результаты механических испытаний и испытаний на ползучесть этой проволоки при температуре отпуска. Коэффициенты, характеризующие ее ползучесть при 400°C , составили: $A = 9,29 \cdot 10^{-3}$; $m = 3,30$; $n = 0,225$. По методике, разработанной В.Т.Козловым, В.Д.Высоциным, определили напряжения $\sigma_{z,n}$, $\sigma_{z,u}$, а по уравнению (18) - напряжения $\sigma_{z,n}$, $\sigma_{z,u}$. Сни-

жение напряжений оказало малосущественным (составило 10,5%).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведены испытания стальных проволок на ползучесть и установлены аналитические формы технических теорий ползучести (теорий старения, течения и упрочнения) для материала стальной проволоки, получившие достаточно хорошее экспериментальное подтверждение.

2. На базе технических теорий ползучести получены зависимости, позволяющие, в отличие от имеющихся эмпирических формул, определять деформации ползучести и потери напряжений от релаксации в стальной проволоке при любом начальном напряжении в любой момент времени. Эти зависимости могут быть использованы для расчетов реологических характеристик таких несущих элементов строительных конструкций, как отдельные проволоки, пучки параллельных проволок, невитые канаты.

3. Применительно к условиям эксплуатации в строительных конструкциях решена задача теории ползучести стальных канатов из круглых проволок: выявлено истинное напряженно-деформированное состояние канатов при ползучести, на основе которого выведены формулы для расчета агрегатных реологических характеристик (деформаций ползучести в случаях установившейся и неуставившейся ползучести и потерь напряжений от релаксации) канатов любой конструкции в любой момент времени, которые удовлетворительно согласуются с результатами экспериментов. Эти формулы позволяют также производить сравнительный расчет реологической стойкости канатов различных конструкций.

4. Деформации ползучести стальных канатов в случаях установившейся и неуставившейся ползучести незначительно отличаются друг от друга. Поэтому при определении этих деформаций можно ограничиться более простыми формулами для случая установившейся ползучести.

5. Разработана методика расчета агрегатных реологических характеристик применяемых в строительных конструкциях стальных канатов из круглых проволок. Она заключается в том, что по результатам испытаний на ползучесть составляющих канат проволок находятся коэффициенты, характеризующие ползучесть этих проволок, а затем по сравнительно простым формулам вычисляются деформации ползучести либо потери напряжений от релаксации в самих канатах. По сравнению с существующей практикой определения агрегатных реологических характеристик канатов за какой-то срок эксплуатации по эмпирическим формулам, полученным статистическим анализом результатов реологических испытаний канатов, эта методика имеет следующие преимущества: 1) существенно упрощает экспериментальные исследования и сокращает их объем; 2) по-

звolyет получить данные для канатов с большим (более 2000 кН) разрывным усилием, когда невозможны реологические испытания таких канатов в связи с отсутствием в настоящее время надлежащего экспериментального оборудования; 3) дает возможность определять деформации ползучести и потери напряжений от релаксации в канатах любых (в том числе и вновь разрабатываемых) конструкций в любой момент времени; 4) позволяет производить сравнительную оценку реологической стойкости канатов различных конструкций; 5) обеспечивает получение результатов более близких к действительным.

6. Выполнено теоретическое исследование релаксации остаточных напряжений от волочения в стальной проволоке на базе технических теорий ползучести, на основе которого выведены формулы для напряжений. Эти формулы могут использоваться для определения степени снижения этих напряжений при температурной обработке в отдельных проволоках и в тех проволоках каната, которые не были подвержены свивке при его изготовлении.

7. Проведено теоретическое исследование релаксации свивочных напряжений в проволоках спирального каната. Формулы для напряжений и крутящего технологического момента упругой отдачи, в отличие от имеющихся, выведены на базе получившихся для материала стальной проволоки достаточно хорошее экспериментальное подтверждение технических теорий ползучести. Эти формулы можно использовать для определения степени снижения свивочных напряжений при температурной обработке спиральных канатов.

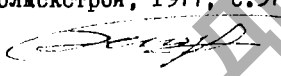
Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Козлов В.Т., Туманский В.И., Белоус П.А. Напряженно-деформированное состояние стальных канатов при ползучести в условиях чистого растяжения.-В кн.: Прочность и долговечность стальных канатов. Киев, "Техніка", 1975, с.89-96.

2. Козлов В.Т., Белоус П.А. Релаксация остаточных напряжений от волочения в канатной проволоке.-Одесса, 1976.-11с.-Рукопись представлена Одесским политехническим институтом. Деп. в ВИНТИ 17 мая 1976, № 1701-76.

3. Козлов В.Т., Белоус П.А. Релаксация напряжений в стальных канатах в условиях чистого растяжения.-Одесса, 1976.-8с.-Рукопись представлена Одесским политехническим институтом. Деп. в ВИНТИ 17 мая 1976, № 1719-76.

4. Белоус П.А., Михайлов К.В., Гуменюк В.С. К оценке релаксации напряжений арматурных канатов.-В кн.: Высокопрочная проволоочная арматура и ее применение в железобетонных конструкциях. Волгоград, Изд-во треста Оргтехстрой Главнииневолжскострой, 1977, с.57-67.



БР 06121. Подп. к печати 20.02.80 г. Формат 60 x 84 1/16.
Объем 1 п. л. Заказ № 1015. Тираж 100 экз.
Гортипография Одесского облполиграфиздата, цех № 3,
Ленина, 49.

НТБ
ДНУЖТ